

# 정수중을 활주하는 고속선의 6자유도 운동 모델링 및 시뮬레이션

윤현규<sup>1,†</sup> · 강남선<sup>2</sup>  
창원대학교 산업조선해양공학부<sup>1</sup>  
중소조선연구원 해양레저장비개발센터<sup>2</sup>

## Modeling and Simulation of the 6 DOF Motion of a High Speed Planing Hull Running in Calm Sea

Hyeon Kyu Yoon<sup>1,†</sup> · Namseon Kang<sup>2</sup>  
School of Industrial and Naval Architecture, Changwon National University<sup>1</sup>  
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

When a planing hull straightly runs and turns, its floating position and pitch angle are changed depending on its speed, and large transient motion happens. In this paper, six degrees of freedom(6 DOF) equations of motion, which could simulate the motion of a planing hull, are established. Static and dynamic forces in vertical plane are modeled using pre-calculated displacements and metacentric heights depending on various draft, lift under bottom, and vertical damping coefficients which are used to tune the final motion. Hydrodynamic coefficients in horizontal plane at various equilibrium state are calculated by using Lewandowski's empirical formula and the speed-dependent equilibrium state are calculated beforehand by Savitsky's formula. The speed effects are considered by curve-fitting the coefficients at various speed to the polynomials. Accelerating, decelerating and backing, turning, and zig-zag are simulated and compared with the sea trial results, and it is confirmed that the speed reduction, roll, and pitch during such maneuvers of sea trial and simulation are well consistent.

**Keywords** : Planing hull(활주선), Equation of motion(운동방정식), Dynamic modeling(동역학 모델링), Simulation(시뮬레이션), Ship handling simulator(선박조종 시뮬레이터)

### 1. 서론

사람들의 1인당 국민소득이 증가하면서 여가선용에 대한 욕구와 해양 레포츠에 대한 관심이 증대되고 있다(Fig. 1). 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있고, 국내 어디에서도 바다로의 접근성이 좋으므로 앞으로 해양 레포츠 수요는 계속하여 증가할 것으로 예상된다. 이러한 해양 레포츠의 적극적인 보급을 위해서 정부에서는 요트를 비롯한 레저선박을 계류하고 관리할 수 있는 마린을 전국에 조성하고 있다 (Committee on the development of East, West and South coastal region, 2010).

해양 레포츠의 하나인 최대 출력이 5마력 이상인 수상레저기구를 조종하고자 하는 사람은 일반조종면허 및 요트조종면허를 취득하여야 한다. 일반조종면허 실기시험은 Fig. 2와 같은 다양한 조종패턴으로 구성되어 있다 (Kang & Yoon, 2013).

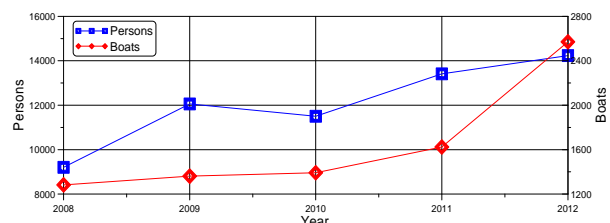


Fig. 1 Number of drivers and leisure boats in 2008~2012 (Korea Coast Guard, 2013)

따라서, Fig. 2의 다양한 조종패턴에 대하여 익숙해질 때까지 어느 정도의 실습이 필요한데 아직까지는 편리하게 마린에 접근하여 레저선박을 운항하기 어렵고, 그 비용도 만만치 않은 실정이다. 만약 레저선박의 조종형태에 따른 운동 특성과 주변 상

항을 잘 모사할 수 있는 레저선박 시뮬레이터를 이용할 수 있다면 실제 해상에서의 실습시간을 대폭 줄일 수 있다. 레저선박 시뮬레이터는 일반적으로 Fig. 3과 같이 육상 고정부와 선체 기동부로 구성할 수 있다. Fig. 4에는 일반적인 레저선박 시뮬레이터의 구성도와 시운전 광경을 도시하였다 (Kang & Yoon, 2013).

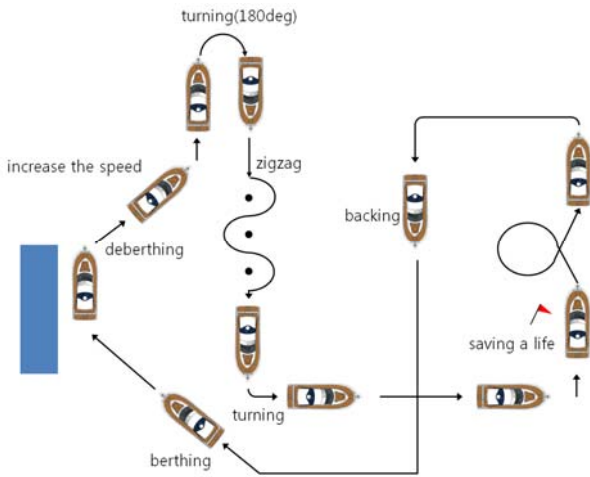


Fig. 2 Typical pattern of driving test of a leisure boat

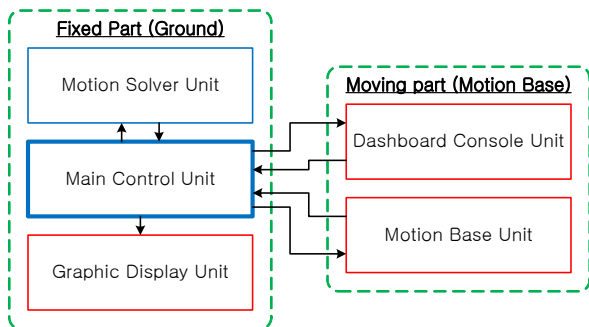


Fig. 3 Configuration of a leisure boat simulator



Fig. 4 Sample of a leisure boat simulator

레저보트 시뮬레이터를 이용하여 실질적인 조종실습을 하기 위해서는 레저선박 운동을 실제와 유사하게 모사하여야 하고, 이는 Fig. 3의 운동계산 처리장치(Motion Solver Unit, MSU) 내 운동 수학모형이 정확하게 정립되어야 한다. 고속 레저선박은 활주선형(planing hull)으로 제작되어 선외기 또는 선내기와 워터제트 및 프로펠러 조합으로 구성되어진다. 이러한 선박은 속력이 증가함에 선저에 큰 양력이 작용하여 선체가 부상하고 선박과 물의

접촉면적을 줄이게 된다. 따라서, 기존 대형 상선의 조종운동을 모델링 할 때처럼 흔히 수직면 운동 및 횡동요를 무시하고 수평면 운동으로만 모델링 하는데는 문제가 있다.

Savitsky (1964)는 주형활주선(prismatic planing hull)의 속력에 따른 선저와 차인의 침수길이, 자세각, 저항 및 유효마력의 계산식을 유도하였고, Lewandowski (1997; 2004)는 활주선의 수평면 안정성 해석을 위하여 활주선의 주요제원이 주어지면 선형 동유체력미계수들을 구할 수 있도록 경험식을 제안하였다. Yoon, et al. (2006)은 실선시험 결과를 이용하여 고품부력선(Rigid hull inflatable boat)의 저항추진 모델을 식별하였다. Yoon, et al. (2014)은 20 ft급 레저선박의 실선 시운전 절차를 제안하고, 그 결과를 통하여 20 ft급 레저선박의 운동 특성을 분석하였다.

본 논문에서는 레저선박의 6자유도 운동방정식을 정립하고, 흘수 및 자세각 변화에 따른 정유체력 변화, 속력 및 자세각 변화에 따른 수평면 동유체력미계수 변화, 양력 및 모멘트계수 변화를 모델링하였다. 이렇게 정립된 운동방정식을 이용하여 Fig. 2의 다양한 조종패턴에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 실선 시운전 결과와 정성적으로 비교하였다.

## 2. 6자유도 운동방정식

### 2.1 좌표계

레저선박의 운동방정식을 기술하기 위해서는 Fig. 5와 같이 2개의 좌표계가 필요하다. 첫 번째는 레저선박의 위치와 자세각을 정의하기 위하여  $X$ 축은 동쪽,  $Y$ 축은 북쪽,  $Z$ 축은 연직상방을 양으로 하는 지구고정좌표계( $O-XYZ$ )이고, 관성좌표계로 간주할 수 있다. 두 번째는 레저선박 운동방정식을 기술하기 위한 비관성좌표계이면서,  $x$ 축은 선수방향,  $y$ 축은 좌현방향,  $z$ 축은 연직상방을 양의 방향으로 하는 레저선박고정좌표계( $o-xyz$ )이다.

$O-XYZ$ 의 원점은 레저선박이 운항을 시작하는 지점에서 레저선박고정좌표계 원점의 위치로 정의한다.  $o-xyz$ 의 원점은 레저선박 내 임의의 기하학적인 점으로서 정지상태에서 수선면, 종중심면, 중앙횡단면이 만나는 점으로 정의한다.  $u, v, w, p, q, r$ 은 레저선박고정좌표계에 대한 선박의 선형 및 각속도이다.

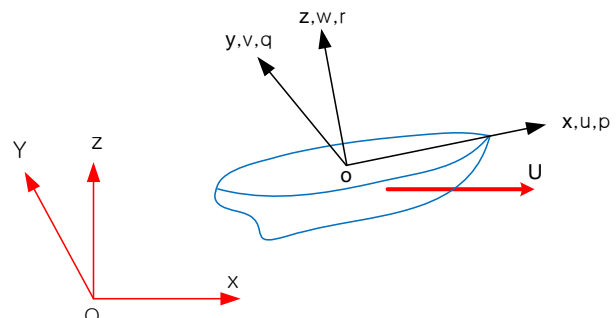


Fig. 5 Coordinate systems and symbol definition

## 2.2 운동방정식

레저선박의 6자유도 운동방정식은 Fig. 5의 레저선박고정좌표계에 대하여 Newton 제 2법칙을 이용하여 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} + qw - rv - x_G(q^2 + r^2) &+ y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X \\
 m[\dot{v} + ru - pw - y_G(r^2 + p^2) &+ z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y \\
 m[\dot{w} + pv - qu - z_G(p^2 + q^2) &+ x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} + pv - qu) &- z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G y_G(pr - \dot{q}) - z_G x_G(pq + \dot{r}) \\
 + y_G z_G(r^2 - q^2)] = K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} + qw - rv) &- x_G(\dot{w} + pv - qu) + y_G z_G(qp - \dot{r}) - x_G y_G(qr + \dot{p}) \\
 + z_G x_G(p^2 - r^2)] = M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) &- y_G(\dot{u} + qw - rv) + z_G x_G(rq - \dot{p}) - y_G z_G(rp + \dot{q}) \\
 + x_G y_G(q^2 - p^2)] = N
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $m$ ,  $I$ 는 각각 선박 질량 및 질량관성모멘트를 나타내고, 하첨자  $G$ 는 무게중심, 상첨자  $\dot{\phantom{x}}$ 는 시간미분을 나타낸다. 운동방정식 우측의  $X$ ,  $Y$ , ...,  $N$ 은 동유체력 및 동유체모멘트를 나타내고, 벡터  $\underline{F}$ 로 표현하면 발생 원인별로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{F} = \underline{F}_H + \underline{F}_G + \underline{F}_B + \underline{F}_P + \underline{F}_{ENV} \tag{2}$$

여기서, 하첨자  $H$ ,  $G$ ,  $B$ ,  $P$ ,  $ENV$ 는 각각 동유체력, 중력, 정유체력, 추진력 및 방향제어력, 환경외력을 나타낸다. 단, 본 논문에서 환경외력은 고려하지 않기로 한다.

## 2.3 중력 및 정유체력

중력 및 정유체력의 크기는 다른 힘들에 비하여 상당히 크므로 중력 및 정유체력을 각각 모델링 하면 시뮬레이션 초기 단계에서 평형상태에 도달하는데 오랜 시간이 걸리거나 수치해석적으로 불안정한 운동을 할 수 있다. 따라서, 중력은 일정하고 레저선박의 부상에 따른 정유체력과의 변화량으로 중력 및 정유체력을 모델링한다.

정유체력의 변화는 종동요각의 변화를 고려하지 않고 레저선박고정좌표계 원점의 지구고정좌표계에 대한 부상 위치인  $Z_0$ 와 원점의 대표흘수( $d_1$ )인  $d - Z_0$ 에 해당하는 부력 변화로 모델링한다. 따라서, 중력과 부력의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta Z_S = -\rho g \{V(d_0) - V(d_1)\} \tag{3}$$

여기서,  $\rho$ ,  $g$ 는 각각 유체 밀도, 중력가속도를 나타내고,  $V(d)$ 는 흘수( $d$ )에 따라 변화하는 배수용적을 나타낸다.

흘수 변화에 따른 정유체력의 변화량만이 중력 및 정유체력 변화에 영향을 주고, 횡동요 및 종동요 복원모멘트 계수는 Lewandowski의 경험식을 적용하면 다음과 같다.

$$\underline{F}_G + \underline{F}_B = \begin{bmatrix} X_G + X_B \\ Y_G + Y_B \\ Z_G + Z_B \\ K_G + K_B \\ M_G + M_B \\ N_G + N_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta Z_S \sin \theta \\ \Delta Z_S \cos \theta \sin \phi \\ \Delta Z_S \cos \theta \cos \phi \\ K_{S\phi} \phi \\ M_{S\theta} \theta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서,  $\phi$ ,  $\theta$ 는 각각 횡동요각과 종동요각을 나타내고,  $K_{S\phi}$ ,  $M_{S\theta}$ 는 각각 횡동요 및 종동요 복원모멘트 계수이다.

Lewandowski의 경험식에서는 메타센터반경( $BM_T$ )을 다음과 같이 평균 침수길이를 이용하여 표현하였으므로, 종메타센터반경( $BM_L$ )도 마찬가지로 정의하기로 한다.

$$BM_T = B^3(L_K + 3L_C)/48 \tag{5}$$

$$\rightarrow BM_L = B(L_K + 3L_C)^3/768$$

여기서,  $L_K$ ,  $L_C$ 는 각각 옹골 및 차인의 침수길이이다.

식 (5)와 선체 측벽효과 계수  $f_{sw}$ 를 이용하면 횡동요와 종동요 복원력계수는 다음과 같다. 여기서,  $\Delta$ 는 배수량이다.

$$K_{S\phi} = -0.624 f_{sw} [\rho g B^3(L_K + 3L_C)/48 + (KB - KG)\Delta] \tag{6}$$

$$M_{S\theta} = -0.624 f_{sw} [\rho g B(L_K + 3L_C)^3/768 + (KB - KG)\Delta]$$

## 2.4 동유체력

동유체력은 다음과 같이 양력계수( $L(U)$ ) 및 양력모멘트계수( $M(U)$ )를 포함한 동유체력미계수( $X_u, \dots$ )를 이용하여 모델링한다. 동유체력 모델 구조는 수평면 경우에는 다항식 형태로 하고, 수직면 경우에는 양력과 양력모멘트를 이용하는 형태로 한다.

$$\underline{F}_H = \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \\ K_H \\ M_H \\ N_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u \dot{u} + X_{vr} vr + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{uu} u^2 - L(U) \sin \theta \\ Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_\phi \phi \\ Z_w \dot{w} + L(U) \cos \theta + Z_q q \\ K_p \dot{p} + K_v v + K_p p + K_\phi \phi \\ M_q \dot{q} + M(U) + M_w w \\ N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_\phi \phi \end{bmatrix}$$

수평면 동유체력미계수는 Lewandowski (1997)가 활주선의 수평면 안정성 해석을 위하여 도출한 경험식을 이용한다. 안정성 해석은 평형상태를 정의하고, 외란에 의한 운동이 매우 작은 경우에 대하여 수행한다. 따라서, Lewandowski의 경험식에 의하여 얻어지는 계수들은 평형상태가 바뀌면 달라져야 한다. 평형상태의 변화가 동유체력미계수에 미치는 영향을 고려하기 위하여 여러 직진 속력에 대하여 정상항주상태를 계산하고, 각 상태별로 동유체력미계수를 구한 후, 속력변화에 따른 계수변화를 속력에 대한 2차식으로 나타내기로 한다.

전후동요 동유체력미계수에서 부가질량계수  $X_u$ 와 편류각에 의한 저항증가를 나타내는 동유체력미계수  $X_{vv}$ 은 0으로 가정하고, 연성운동에 의한 부가질량 성분을 Inlray 결과식 (Fossen, 1994)을 이용하여 나타내면 다음과 같다. 여기서, 좌우동요 부가질량계수는 Lewandowski (2004)의 경험식을 적용한다.

$$\begin{aligned} X_u &= 0 \\ X_{vv} &= 0 \\ X_{rr} &= -Y_r \\ X_{vr} &= -Y_v \end{aligned} \tag{8}$$

정상상태 저항은 속력에 따라서 계산된 전체저항을 이용하여 모델링한다.

레저선박이 트림졌을 때 선저에 작용하는 양력은 레저선박의 속력, 평균 침수길이 등에 따라 달라지게 된다. 시뮬레이터와 같은 넓은 속력범위를 고려해야 하는 경우는 양력계수와 양력모멘트계수를 속력의 함수로 나타내는 것이 편리하다. 본 논문에서는 준정상상태를 가정하여 비정상상태에서도 속력이 정상상태와 같다면 모든 자세관련 변수가 같다고 가정하고, 속력에 따른 정상상태에서의 양력계수와 압력중심이 비정상상태에서도 동일하게 적용될 수 있다고 가정한다. 이 때 양력계수와 압력중심점은 Lewandowski (2004)의 경험식을 적용한다.

Lewandowski (2004)의 선저 양력은 레저선박의 자세변화에도 변하지 않는 등속이동좌표계에서 상방향을 양의 방향으로 설정하였으므로, 레저선박고정좌표계에 대한 값으로 변환해 주어아 한다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 종동요각이 0°보다 큰 경우에는 양력과 양력모멘트는 0이 되어야 한다.

$$\begin{aligned} \text{if } \theta < 0, \Delta X_H &= -L(U)\sin\theta \\ Z_H &= L(U)\cos\theta \\ M_H &= M(U) \\ \text{if } \theta \geq 0, \Delta X_H &= Z_H = M_H = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

속력에 따른 양력계수의 변화는 속력에 대한 최적차수의 다항식으로 모델링 한다.

수직면 동유체력 모델에서  $Z_q$ ,  $M_w$ 는  $L(U)$ ,  $M(U)$ 에 포함되는 항이다. 따라서, 이것을 같이 고려하는 것은 중복될 수 있으나 Lewandowski의 경험식이 모든 경우를 정확하게 모사하기는 어렵기 때문에 일종의 가상 감쇠력으로 작용하는  $Z_q$ ,  $M_w$ 를 추가할 필요가 있다.  $Z_q$ 는 종동요 각속도에 의한 상하방향 운동

의 동적안정성을 보장하고, 정상상태 종동요각의 변화를 주기 위해서는  $M_w$  값 크기를 조절하면 된다.

## 2.5 추진력 및 방향제어력

레저선박의 추진동력장치는 일반적으로 디젤기관과 워터제트의 조합을 사용하거나 엔진과 추진기의 일체형으로 되어 있는 선외기를 많이 사용한다. 본 연구에서는 추진장치로서 워터제트 추진기를 적용하고, 임펠러의 회전수는 선형적으로 증감하고, 조종자가 엔진 스로틀을 이용하여 엔진회전수를 조정하면 추진력이 바로 발생한다고 가정한다.

워터제트 추진기는 다음과 같이 유동관로 내에 설치된 임펠러가 물을 가속시킴에 따라서 발생하는 속도차이를 이용하여 추진력을 얻는다.

$$T = \rho U_j A_j (U_j - u) \tag{10}$$

여기서,  $T$ ,  $U_j$ ,  $A_j$ ,  $u$ 는 각각 추진력, 임펠러 회전수(또는 엔진 회전수)에 따른 제트의 속력, 워터제트 노즐의 단면적, 선박의 전진방향 속도를 나타낸다.

식 (10)에서 추진력을 계산하기 위해서는 실시간으로 변화하는 제트의 속력을 알아야 한다. 제트의 속력은 회전수의 함수가 되는 항주속력  $U_0(n)$ 와 그 속력에서의 저항  $R_0$ 가 주어지면 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$U_j = \frac{U_0 + \sqrt{U_0^2 + \frac{4R_0}{\rho A_j}}}{2} \tag{11}$$

결국, 임펠러 또는 엔진회전수와 항주속력 간의 관계식에 따라 회전수를 입력하면 항주속력이 결정되고, 이 항주속력과 Savitsky의 관계식을 이용하여 전체저항을 추정한다. 이렇게 추정된 전체저항을 식 (11)에 대입하면 제트의 속력을 알 수 있다.

일반적으로 소형선박은 타(Rudder)를 사용하지 않는다. 선외기를 사용하는 선박은 선외기의 추력방향을 변경하여 추진력과 동시에 방향제어력을 얻고, 워터제트 추진기를 사용하는 경우도 워터제트 분사 버킷각을 변경하여 방향제어력을 얻는다. 따라서 각 운동 방향의 추진력과 방향제어력은 다음 식과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_\delta \\ Y_\delta \\ Z_\delta \\ K_\delta \\ M_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T\cos\delta \\ T\sin\delta \\ 0 \\ y_T Z_\delta - z_T Y_\delta \\ z_T X_\delta - x_T Z_\delta \\ x_T Y_\delta - y_T X_\delta \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서,  $T$ 는 식 (10)으로 계산되는 워터제트에 의한 추진력이고,  $\delta$ 는 워터제트 버킷각,  $x_T$ ,  $y_T$ ,  $z_T$ 는 각각 워터제트의 추진력 발생 위치를 나타낸다.

### 3. 대상선박 및 동유체력미계수

#### 3.1 주요제원 및 흘수별 배수용적, 수선면적 변화

본 논문에서는 40 ft급 레저선박을 대상선박으로 선정하였다. Table 1에는 대상선박의 주요제원을 나타내었고, Fig. 6에는 대상선박의 흘수별 배수용적 및 수선면적 변화값을 도시하였다.

Table 1 Principal dimensions of target ship

LOA	13.0 m	
Breadth	4.52 m	
Height	2.15 m	
Draft	0.9 m	
Disp.	18.9 ton	
Speed	>30 knots	

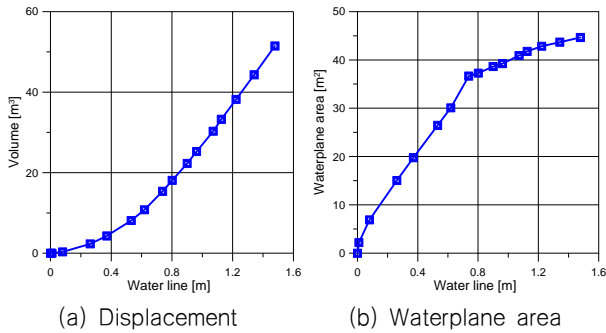


Fig. 6 Change of displacement and waterplane area depending on the draft

#### 3.2 속력에 따른 정상항주 상태

Table 2 Steady state values depending on the speed

Speed (knots)	Trim angle (deg)	Chine Wet length(m)	Keel Wet length(m)	Total Resistance (N)	EHP
5	3.33	11.17	19.95	11267.5	38.9
10	4.06	10.54	17.74	14930.6	103.0
15	5.25	9.14	14.71	20470.5	211.8
20	6.14	7.49	12.25	25106.4	346.4
25	5.93	6.27	11.20	26537.7	457.7
30	5.25	5.38	10.95	26901.1	556.7
35	4.55	4.64	11.07	27660.3	667.8
40	3.95	3.96	11.37	29184.2	805.3
45	3.46	3.31	11.77	20290.3	977.5
50	3.06	2.68	12.24	34508.5	1190.2
55	2.73	2.05	12.75	38173.0	1448.3
60	2.47	1.43	13.28	42422.5	1755.8

Table 1의 대상선박에 대해서 Savitsky 식으로부터 계산된 정상항주 상태를 Table 2에 나타내었다. 이 값들은 자세에 따라 변

하는 동유체력미계수를 구하는데 입력값으로 적용되어 간접적으로 동유체력미계수에 대한 속력 영향을 반영하게 된다.

#### 3.3 속력에 따른 수평면 동유체력미계수

특정 속력에서 Lewandowski의 경험식을 이용하여 추정된 전후동요, 좌우동요, 횡동요, 선수동요 동유체력미계수를 다음과 같이 항주속력에 대한 2차식으로 모델링한다.

$$C = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 \quad (13)$$

여기서, 레저선박 속력 단위는 m/s이다.

Table 3과 Table 4에는 좌우동요, 선수동요에서 대표적인 무차원(계수 우측에 ' 표시) 동유체력미계수들에 대한 2차식 계수들을 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에는 Table 3과 Table 4에 나타난 계수들에 대하여 속력에 따른 값 변화 및 곡선맞춤 결과를 도시하였다.

Table 3 Typical speed-dependent coefficients (Sway)

Coeff.	$Y'_v$	$Y'_r$	$Y'_v$	$Y'_r$
$a_0$	-9.57E-3	-5.51E-3	-2.43E-7	4.47E-3
$a_1$	4.67E-4	4.01E-4	1.23E-7	1.78E-4
$a_2$	-8.69E-6	-8.38E-6	-5.11E-4	-6.76E-6

Table 4 Typical speed-dependent coefficients (Yaw)

Coeff.	$N'_v$	$N'_r$	$N'_v$	$N'_r$
$a_0$	-5.51E-3	-4.12E-3	-5.57E-3	-1.76E-3
$a_1$	4.01E-4	3.54E-4	1.52E-3	4.06E-5
$a_2$	-8.38E-6	-7.80E-6	3.95E-5	-1.54E-6

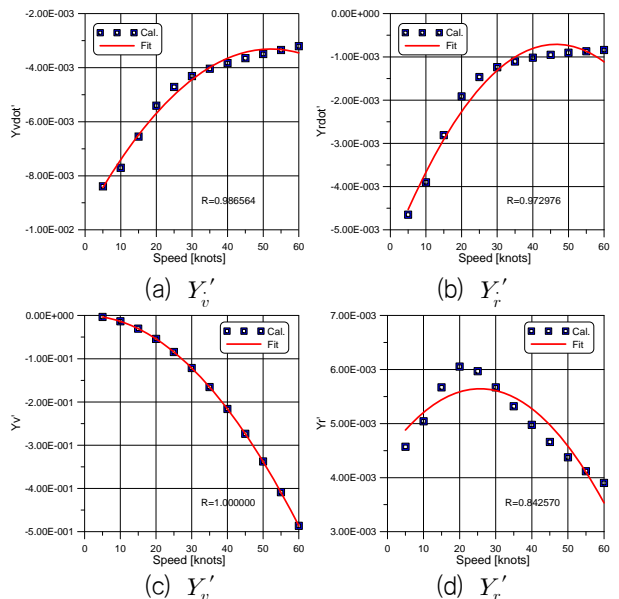


Fig. 7 Change of sway hydrodynamic coefficients

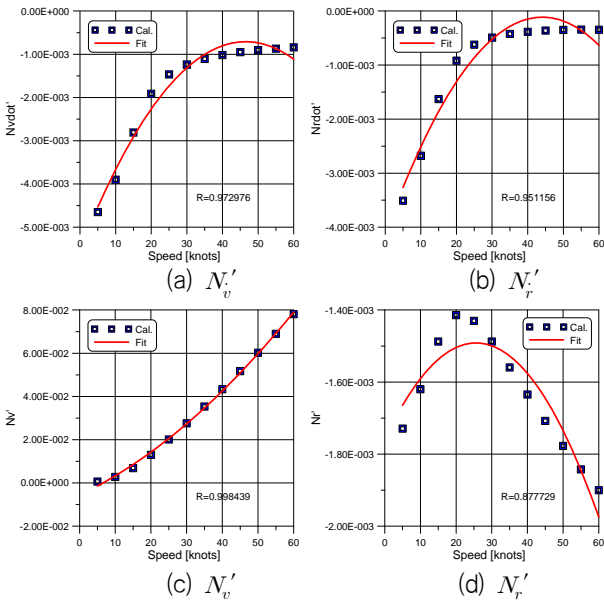


Fig. 8 Change of yaw hydrodynamic coefficients

### 3.4 속력에 따른 수직면 동유체력계수

속력에 따른 양력계수, 양력모멘트계수의 변화도 수평면 동유체력계수와 마찬가지로 속력에 대한 다항식으로 모델링하는데 그 차수는 4차로 한다. 다음은 양력계수와 양력모멘트계수의 무차원 방식인데 각 속력에서의 평균 침수차인 폭( $\bar{B}$ )을 이용하고,  $U$ 는 합속력을 나타낸다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 \bar{B}^2}, \quad C_M = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 \bar{B}^3} \quad (14)$$

Table 5 Speed-dependent coefficients (Lift and moment)

Coeff.	$C_L$	$C_M$
$a_0$	-2.05E-3	-5.64E-2
$a_1$	2.10E-2	-1.56E-2
$a_2$	-1.71E-3	1.80E-3
$a_3$	4.75E-5	-6.76E-5
$a_4$	-4.31E-7	8.53E-7

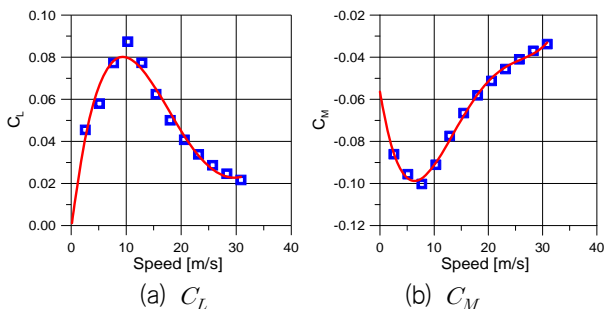


Fig. 9 Change of lift and moment

Table 5에는 양력계수와 양력모멘트계수의 속력에 대한 4차식 계수들을 나타내었고, Fig. 9에는 Table 5에 나타난 계수들에 대하여 속력에 따른 값 변화 및 곡선맞춤 결과를 도시하였다.

### 3.5 복원력계수의 속력에 따른 영향

레저선박 복원력계수도 자세에 따라 변하게 된다. 수평면 동유체력계수와 마찬가지로 복원력계수의 변화를 속력에 대한 2차식으로 모델링 한다. Table 6에는 복원력계수의 속력에 대한 2차식 계수들을 나타내었고, Fig. 10에는 Table 6에 나타난 계수들에 대하여 속력에 따른 값 변화 및 곡선맞춤 결과를 도시하였다.

Table 6 Speed-dependent coefficients (Restoring moment)

Coeff.	$K'_{S\phi}$	$M'_{S\phi}$
$a_0$	-2.34E-1	-9.04E-1
$a_1$	7.30E-3	2.86E-2
$a_2$	-7.43E-5	-2.46E-4

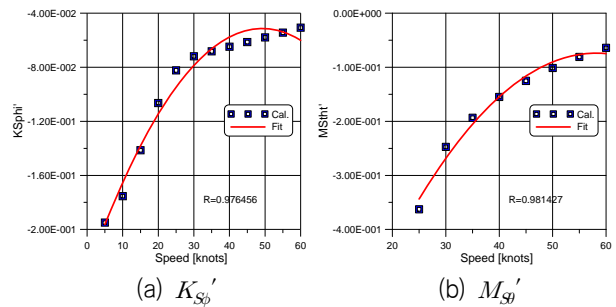


Fig. 10 Change of restoring moment

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1 가감속 및 후진

Fig. 11과 Fig. 12에는 각각 가속, 감속 후 후진시의 속력 및 자세각 변화를 도시하였다. 후진시에는 선저 양력이 없고, 추진력은 전진시보다 효율이 감소한다고 가정하여 선형 동유체력계수와 정지상태에서의 복원력계수를 이용하여 동유체력을 모델링하였다.

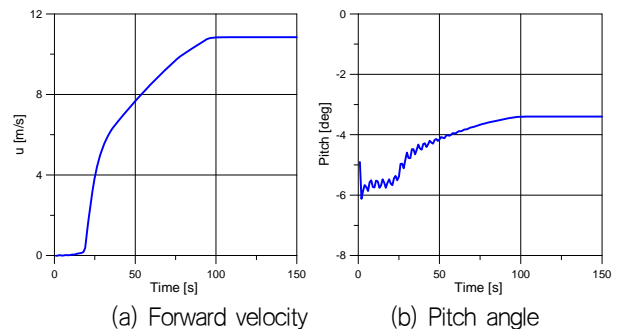
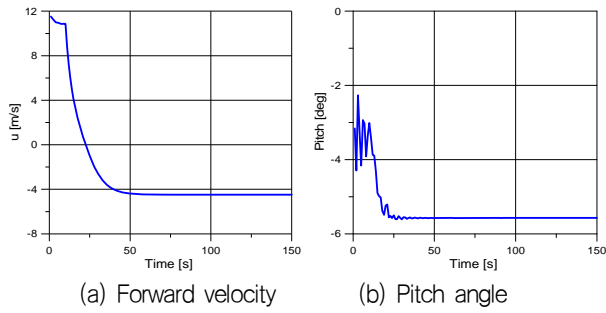


Fig. 11 Time histories of motion variables (Acceleration)

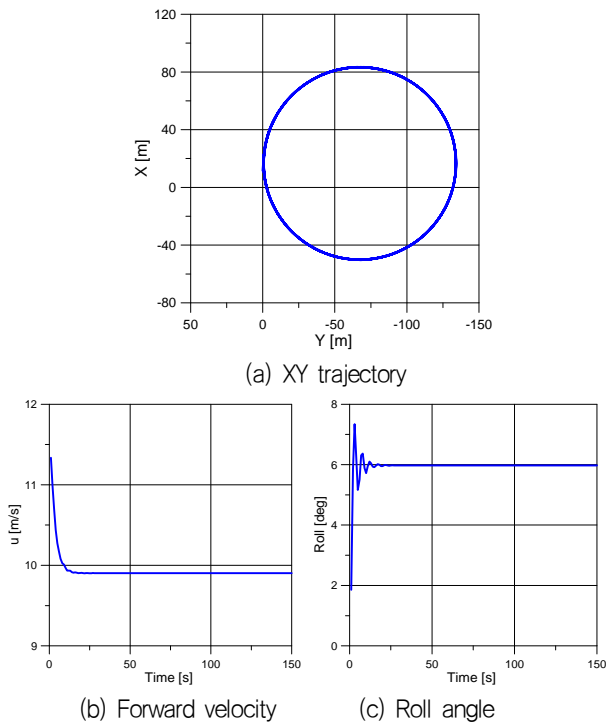


(a) Forward velocity (b) Pitch angle  
Fig. 12 Time histories of motion variables (Decelerating and backing)

Fig. 11과 Fig. 12에 의하면 초기에는 아직 정력학적으로 안정화 되지 않은 상태이므로 종동요각이 약간 진동하는 것을 볼 수 있고, 가감속 경우 모두 속력이 0 m/s 근처에서는 유체 동력학적 감쇠력이 작게 작용하므로 선박 고유주기로 운동한다.

### 4.2 선회

레이저선박이 초기 속력 12 m/s로 항주하면서 워터제트 버킷각을 10° 변경하여 우현 선회할 때, Fig. 13에 선회궤적과 전후동요 속도 및 횡동요각을 도시하였다. Fig. 14에는 대상선박과는 다른 20 ft급 레이저선박의 좌현선회 실선시험 결과를 도시하였다 (GCSC, 2013). 여기서, 양의 횡동요각은 좌현 방향이고, 음의 종동요각은 선수가 틀리는 경우이다.



(b) Forward velocity (c) Roll angle  
Fig. 13 Time histories of motion variables (Turning)

고속 선박일수록 과도하게 선회하지 않는 경우에는 직진성이 좋으므로 속력변화가 적고, 일반 대형 상선과는 달리 선회 방향

으로 내방 경사가 일어난다. Fig. 13에 의하면 속력 감소는 적고, 우현 선회시 우현 횡동요가 일어나는 것을 볼 수 있다. Fig. 14의 실선 시운전 결과와 비교하면 일단 선회가 시작되면 속력 감소가 일어나고 선회방향과 동일한 방향으로 횡동요가 발생하는 동일한 경향이 확인된다.

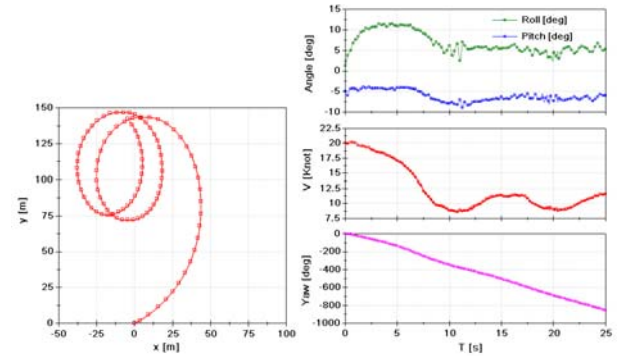
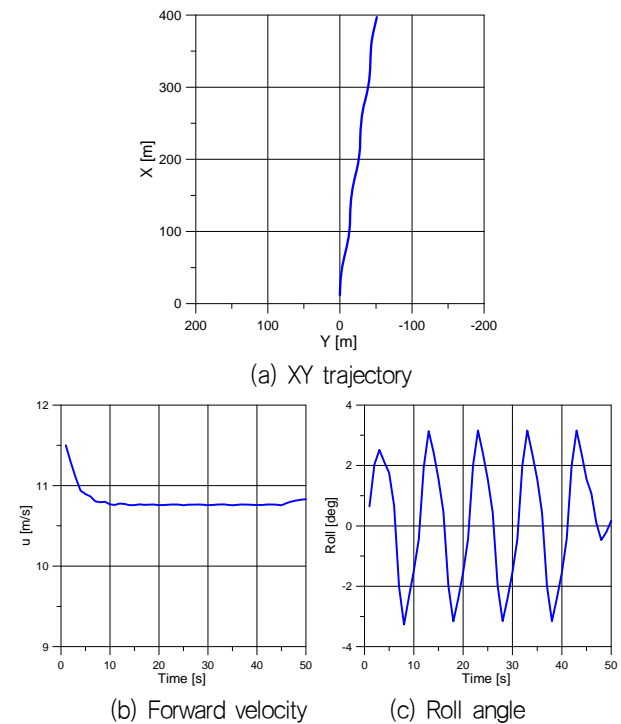


Fig. 14 Sea trial results (Turning)

### 4.3 사행

레이저선박이 초기 속력 12 m/s로 항주하면서 워터제트 버킷각을 5초 주기로 10°씩 9회 변경하여 사행(zig-zag 시험)할 때 Fig. 15에 궤적과 전후동요 속도 및 횡동요각을 도시하였다. Fig. 16에는 20 ft급 레이저선박의 사행 실선시험 결과를 도시하였다.



(b) Forward velocity (c) Roll angle  
Fig. 15 Time histories of motion variables (Zig-zag)

Fig. 15의 사행시험 결과는 Fig. 13의 선회시와 유사한 양상을 보이고 있다. 선회각이 크지 않으므로 속력 변화가 적고, 횡

동요는 선회 방향과 동일한 위상을 가지고 발생하는 것을 볼 수 있다. 횡동요는 선회시에는 약 6° 정도로 일어나지만, 사행시에는 과도 상태이므로 절반 정도의 횡동요가 주기적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 16의 실선 시운전 결과와 비교하면 침로 각이 바뀔 때 20 ft급 레저선박의 결과 보다 횡동요가 적게 일어나고 있다. 이러한 결과적인 운동 크기를 이론적인 방법으로만 실제와 유사하게 맞추는데는 어려움이 있다. 앞으로 40 ft급 대상선박의 실선시운전을 통하여 동유체력미계수 등을 조정하는 것이 보다 실용적인 방법이라고 사료된다.

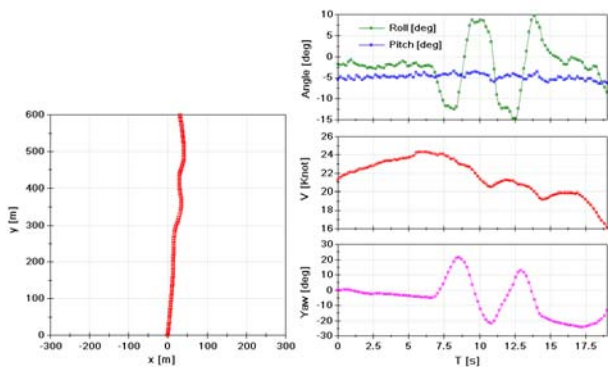


Fig. 16 Sea trial results (zig-zag)

## 5. 결론

본 논문에서는 레저선박 조종면허시험시 실습용으로 사용할 수 있는 시뮬레이터 구성에 필수적인 운동 모델을 정립하였다. 활주선형을 갖는 레저선박은 속력 및 조종패턴에 따라 자세변화가 크므로 일반적인 수평면 조종운동방정식에 수직면 모델을 추가하여야 실제와 유사한 운동을 모사할 수 있다. 수평면 및 수직면 동유체력미계수, 양력계수, 모멘트계수는 속력별로 계산된 자세 변수들을 Lewandowski 경험식의 입력으로 하여 시뮬레이션 시간 동안 변하는 값들로 모델링 하는 방법을 제안하였다.

40 ft급 레저선박을 대상선박으로 선정하여 가속, 감속 및 후진, 선회, 사행의 조종패턴에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 일반적인 활주선형을 갖는 레저선박의 운동패턴과 유사하게 모사되는 것을 확인하였지만 실제 운동 크기 및 고유주기 운동 등이 실제와 유사한 지는 대상선박과 동일한 실선 시운전을 통하여 확인하여야 한다.

향후에 40 ft급 대상선박의 실선 시운전을 통하여 일부 계수들의 튜닝 등과 같은 시스템 식별 과정을 통하여 실용적으로 실제와 유사한 결과를 제공하는 운동 모델을 정립하여야 한다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 글로벌전문기술개발사업 “3D 소형 해양레저선박 조종시뮬레이터 개발” (과제번호: 10042075)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Committee on the development of East, West and South coastal region, 2010. *Developing plan for East, West, and South coastal region*. Yonhap news: Seoul.
- Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons: Chichester.
- Global Control Systems Cooperation (GCSC), 2013. *Development of small leisure boat handling 3D simulator, annual report*. Busan: GCSC.
- Kang, N. & Yoon, H.K., 2013. A Study for the Conceptual Design of a Small Leisure Boat Handling Simulator. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 22(4), pp.99-107.
- Korea Coast Guard, 2013. *Korea Coast Guard 2013 White Paper*. Korea Coast Guard: Incheon.
- Lewandowski, E.M., 1997, Transverse Dynamic Stability of Planing Craft. *Marine Technology*, 34(2), pp.109-118.
- Lewandowski, E.M., 2004. *The Dynamics of Marine Craft*. World Scientific: Singapore.
- Savitsky, D., 1964. Hydrodynamic Design of Planing Hulls. *Marine Technology*, 1(1), pp.71-95.
- Yoon, H.K. Seong E. Kang, N. & Sin, I., 2014. Motion analysis of 20 ft semi-planing power boat using sea trial test. *12th 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime*, Istanbul, Turkey, 23-24 October 2014, pp.569-578.
- Yoon, H.K. Yun, K. & Park, I., 2006. Identification of Four-DOF Dynamics of a RIB Using Sea Trial Tests (1) - Sea Trial Test, Resistance and Propulsion Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.63-68.



윤현규

강남선